

РАДИОФИЗИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ
В ТВЕРДОМ ТЕЛЕ И ПЛАЗМЕ

УДК 538.9

НЕЛИНЕЙНАЯ ДИНАМИКА
ГИБРИДНОЙ ДЖОЗЕФСОНОВСКОЙ ГЕТЕРОСТРУКТУРЫ
С КУПРАТНОЙ АНТИФЕРРОМАГНИТНОЙ ПРОСЛОЙКОЙ© 2019 г. К. И. Константиан¹*, Г. А. Овсянников¹, А. В. Шадрин¹, Ю. В. Кислинский¹¹Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН,
Российская Федерация, Москва, ул. Моховая, 11, стр. 7

*E-mail: karen@hitech.cplire.ru

Поступила в редакцию 12.03.2019 г.

После доработки 19.03.2019 г.

Принята к публикации 26.03.2019 г.

Экспериментально исследован нестационарный эффект Джозефсона в гибридной гетероструктуре на основе купратного сверхпроводника $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$, купратной антиферромагнитной барьерной прослойки $\text{Ca}_{0.5}\text{Sr}_{0.5}\text{CuO}_2$ и с верхним сверхпроводящим электродом Au/Nb . На частоте внешнего воздействия $f = 70$ ГГц, близкой к плазменной частоте джозефсоновского перехода, обнаружен гигантский рост шумового сигнала, объясняемый возникновением стохастических колебаний на гетероструктуре. Стохастические колебания, но с меньшей интенсивностью происходят и на частоте $f = 45$ ГГц. При этом на вольт-амперных характеристиках возникают участки с отрицательным динамическим сопротивлением.

DOI: 10.1134/S0033849419090134

ВВЕДЕНИЕ

В последнее время повышенный интерес привлекает исследование джозефсоновских структур с магнитными прослойками [1, 2]. Ранее аномальный эффект близости в сверхпроводниках с высокой критической температурой наблюдался в структурах $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4/\text{La}_2\text{CuO}_{4-\delta}/\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$ [3], а также в гибридных гетеропереходах $\text{Nb/Au/Ca}_x\text{Sr}_{1-x}\text{CuO}_2/\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ [4–6]. В частности, было показано [6], что при антиферромагнитном упорядочении намагниченности может реализоваться аномальный эффект близости, определяемый синглетной компонентой конденсатной волновой функции. Вследствие этого критические токи в таких структурах могут совпадать по порядку величины даже в том случае, когда толщина антиферромагнитной прослойки существенно превосходит длину спада конденсатной волновой функции в ферромагнитных слоях. Также известно [7], что нестационарные процессы в джозефсоновских контактах в условиях отличных от равновесных зачастую невозможно описать обычной моделью резистивно-шунтированного перехода (RSJ-модель). Для описания поведения джозефсоновского перехода в нестационарном случае помимо частоты f и амплитуды $I_{\text{СВЧ}}$ внешнего воздействия важное значение имеет соотношение характерной частоты $f_0 = (2e/h)I_c R_N$, частоты среза $f_{\text{RC}} = 1/2\pi R_N C$ и плазменной $f_p = (2eI_c/hC)^{1/2}$, а также параметра МакКамбера $\beta_C = f_0/f_{\text{RC}}$, где I_c – критический ток,

R_N – сопротивление в нормальном состоянии, C – емкость перехода, e и h – заряд электрона и постоянная Планка, соответственно.

В сверхпроводниковых $\text{Nb/Au/Ca}_{0.5}\text{Sr}_{0.5}\text{CuO}_2/\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ гетероструктурах, изготовленных на подложках с наклоном плоскости (110) NdGaO_3 на 11 град вокруг направления $[-111]\text{NdGaO}_3$, был обнаружен сверхпроводящий ток, имеющий джозефсоновскую природу, а ток-фазовая зависимость сверхпроводящего тока отличалась от синусоидальной из-за 20% вклада второй гармоники ($\sim \sin 2\varphi$) [4, 5]. Однако нестационарные процессы в гетероструктурах, изготовленных на подложках NdGaO_3 без указанного выше наклона, оставались недостаточно изученными.

1. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Тонкую пленку барьерной прослойки $\text{Ca}_{0.5}\text{Sr}_{0.5}\text{CuO}_2$ осаждали методом лазерной абляции при температуре 750°C поверх сверхпроводника $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$, температура осаждения которого была 770°C . Верхним электродом гетероструктуры был сверхпроводник Au/Nb . Топологию структуры формировали методами фотолитографии, плазмохимического и ионного-лучевого травлений. В результате получались квадратные меза-структуры с размерами $L = 10...50$ мкм в плоскости подложки.

Измерения изготовленных гетероструктур проводили при $T = 4.2$ К на частотах СВЧ-сигна-

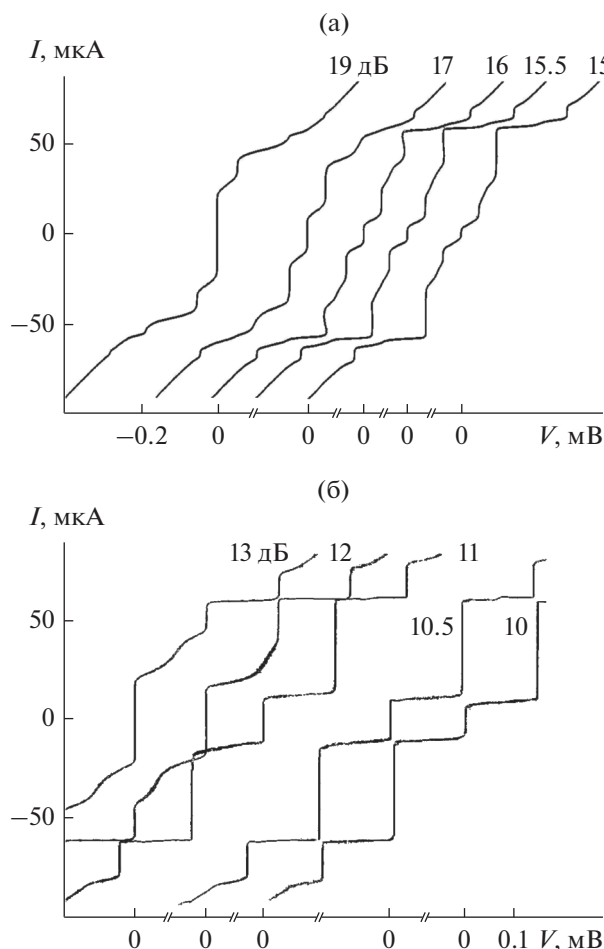


Рис. 1. Семейство ВАХ, снятых при $T = 4.2$ К под воздействием СВЧ-сигнала с частотой $f = 45$ ГГц (а) и $f = 70$ ГГц (б) при различных значениях вносимого аттенюатором затухания. Зависимости для наглядности смещены по оси напряжения, значения $V = 0$ соответствуют положению критического тока. Масштаб по напряжению V на рис. 1а приведен для ВАХ при затухании 19 дБ, на рис. 1б — при затухании 10 дБ.

ла $f = 45$ и 70 ГГц в условиях экранирования от СВЧ-помех, а измерения ВАХ — при помощи аналоговой аппаратуры с аккумуляторным питанием. Мощность сигнала электромагнитного облучения P изменяли поляризационными аттенюаторами в пределах затухания до 70 дБ. Интегральную мощность собственных шумов $P_{ш}$ и спектр возникающего на гетероструктуре сигнала регистрировали охлаждаемым НЕМТ-усилителем с рабочей полосой от 1 до 2 ГГц. Усилитель имел собственную шумовую температуру $T_{ш1} = 8 \pm 2$ К и коэффициент усиления $G_1 = 20$ дБ при $T = 4.2$ К. Балансная схема входного каскада усилителя обеспечивала устойчивую работу усилителя в широком диапазоне сопротивлений нагрузки 10...100 Ом и понижала температуру фонового излучения, попадающего на образец по коаксиальному кабелю. На шумовые характеристики измерительной систе-

мы влиял второй каскад комнатного усилителя с $T_{ш2} = 130$ К, $G_2 = 40$ дБ, и отрезок коаксиального кабеля с затуханием $\alpha \leq 0.2$ дБ, соединяющий НЕМТ-усилитель с образцом. Выходной сигнал контролировался анализатором спектра и одновременно детектировался полупроводниковым квадратичным детектором.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На ВАХ экспериментальных образцов избыточный ток не наблюдался, а параметр МакКамбера был в пределах $\beta_C = 1...3$, оцененный по гистерезису по прямому и обратному изменению тока смещения. Величина $I_c R_N$ составляла величину 205...214 мкВ для структур с размерами $L = 20...40$ мкм. Далее будем рассматривать образец с размером $L = 20$ мкм, толщиной барьерного слоя $d = 40$ нм, $I_c = 48$ мкА, $R_N = 4.3$ Ом, $\beta_C = 2$. На рис. 1а приведены ВАХ, снятые под воздействием СВЧ-сигнала на частоте $f = 45$ ГГц. Видны ступени Шапиро при напряжениях $V_n = nhf/2e$, где n — номер токовой ступени Шапиро. Заметим, для $n = 0$ будет использоваться обозначение I_0 . По RSJ-модели перехода без емкости с размером $L < 2\lambda_J$, где λ_J — джозефсоновская глубина проникновения магнитного поля [8], ступени с дробными n отсутствуют [7]. Однако в эксперименте были обнаружены и дробные ступени. Так, ступени с $n = 1/2$ видны на всех ВАХ на рис. 1а. Одновременно были зарегистрированы искажения ступеней, демонстрирующие отрицательное динамическое сопротивление (уменьшение напряжения с увеличением постоянного тока смещения I), что видно на ВАХ при затухании 16 дБ на рис. 1а. На более высокой частоте измерений $f = 70$ ГГц (см. рис. 1б) появляются неустойчивые участки на ВАХ между ступенями Шапиро. Такие искажения ВАХ известны в литературе, как “чертовые ступени” (devil’s staircase) [9–11] и являются результатом стохастического поведения нелинейной системы. В то же время наличие ступеней Шапиро указывает, что в спектре собственных осцилляций гетероструктуры содержатся частотные компоненты, синхронизируемые внешним монохроматическим сигналом. На рис. 2 приведены зависимости амплитуд критического тока I_0 и ступеней Шапиро I_1, I_2, I_3 от нормированного значения тока СВЧ воздействия $i_{СВЧ} = I_{СВЧ}/I_c$ на частоте $f = 45$ ГГц. Приведенные на рис. 2 теоретические зависимости построены с использованием RSJ-модели [8], которая хорошо описывает поведение джозефсоновского перехода в высокочастотном пределе $f > f_0$. Однако, экспериментальные данные на рисунке демонстрируют особенности, которые не могут быть смоделированы рамках RSJ-модели с учетом соотношения частот f, f_0, f_p и β_C (см, например, [12]). Так, на рис. 2а видна особенность на интервале $i_{СВЧ} = 2...3$ и рез-

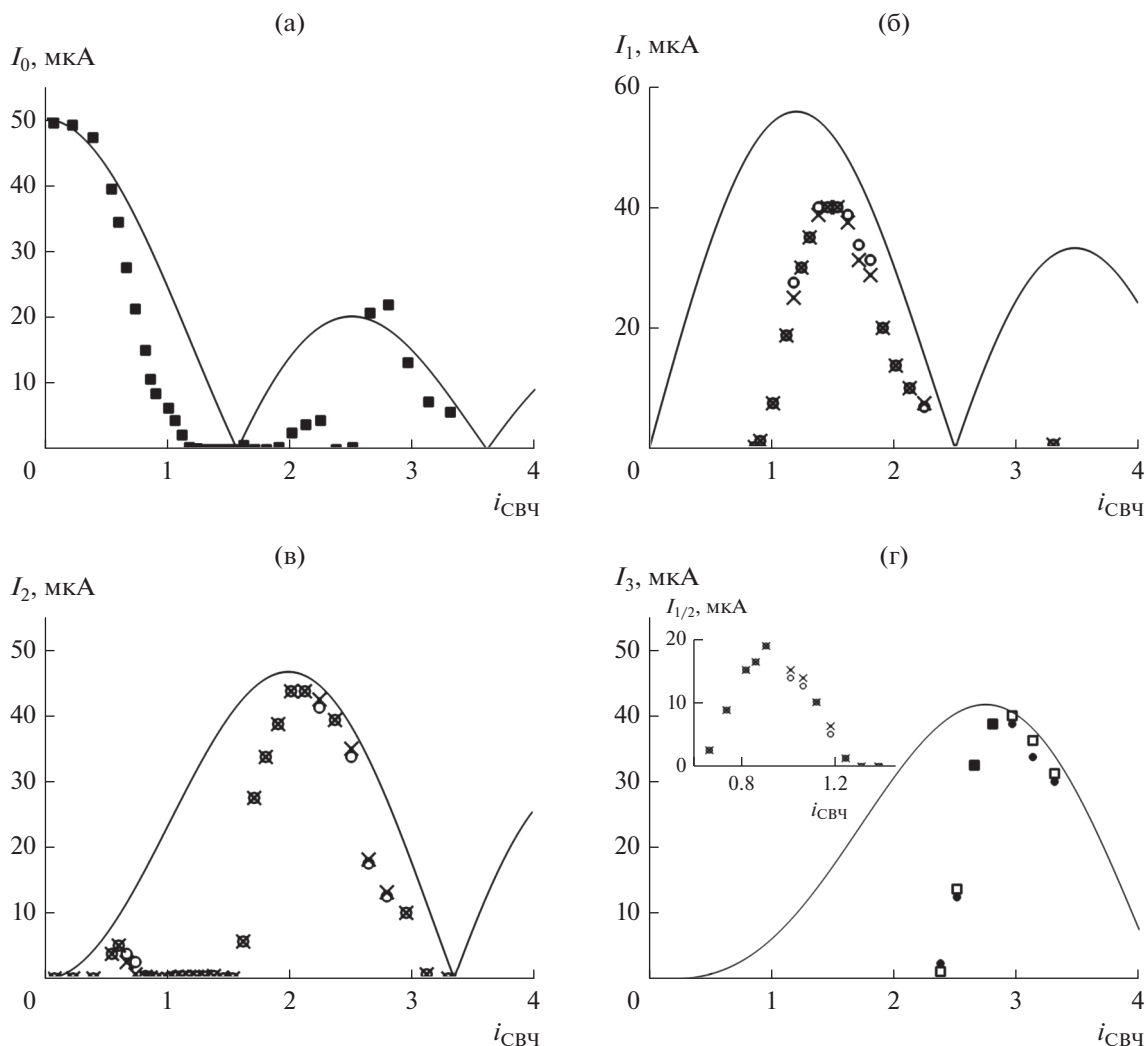


Рис. 2. Зависимости амплитуд критического тока I_0 (а) и ступеней Шапиро I_1 (б), I_2 (в), I_3 (г) от нормированного значения тока СВЧ-воздействия на частоте $f = 45$ ГГц. Крестики и кружки – экспериментальные данные, полученные при разнополярных напряжениях; сплошные кривые – теоретические зависимости с аргументом, служащим подгоночным параметром. На вставке к рис. 2г показаны амплитуды субгармонической ступени $I_{1/2}$.

кий рост при $i_{\text{СВЧ}} = 2.5$, также интересна особенность на интервале $i_{\text{СВЧ}} = 0.5...0.75$ на 2-й ступени Шапиро I_2 (см. рис. 2в). Пример возникновения субгармонической ступени с $n = 1/2$ представлен на вставке рис. 2г. Из рис. 2 также видно, что на определенных интервалах $i_{\text{СВЧ}}$ ступени Шапиро отсутствовали, а затем с увеличением $i_{\text{СВЧ}}$ начинали появляться вновь. Изменение амплитуд ступеней Шапиро на частоте $f = 70$ ГГц происходило монотонно без разрывов осцилляционной формы (см. рис. 3) несмотря на неустойчивости на ВАХ между ступенями. Отметим, что на данной частоте максимумы амплитуд ступеней Шапиро возросли, что следует из RSJ-модели для случая $f/f_0 = 0.7$. При таком соотношении частот уже возможно возникновение хаотических колебаний, так как отношение f/f_p уже близко к единице [7, 13]. Возникновение хаоса в структурах с магнитно-актив-

ным барьером было рассмотрено в работе [14]. Скорее всего, на стохастическое поведение фазы джозефсоновского перехода оказывают влияние как близость частоты внешнего воздействия к плазменной, так и наличие магнитных корреляций в магнитно-активном барьере $\text{Ca}_x\text{Sr}_{1-x}\text{CuO}_2$.

На рис. 4 приведено семейство зависимостей $P_{\text{ш}}$ от тока смещения I , возникающих на гетероструктуре при воздействии СВЧ-облучением на $f = 45$ ГГц при различных значениях мощности. Отметим, начало возникновения шумового сигнала соответствует значениям $i_{\text{СВЧ}}$, при которых начинает появляться дробная ступень Шапиро и особенность на зависимости $I_2(i_{\text{СВЧ}})$. С увеличением мощности СВЧ-воздействия P диапазон токов I расширяется, охватывая участки с более широкими интервалами $i_{\text{СВЧ}}$, но при этом максимальная амплитуда $P_{\text{ш}}$ изменяется незначительно

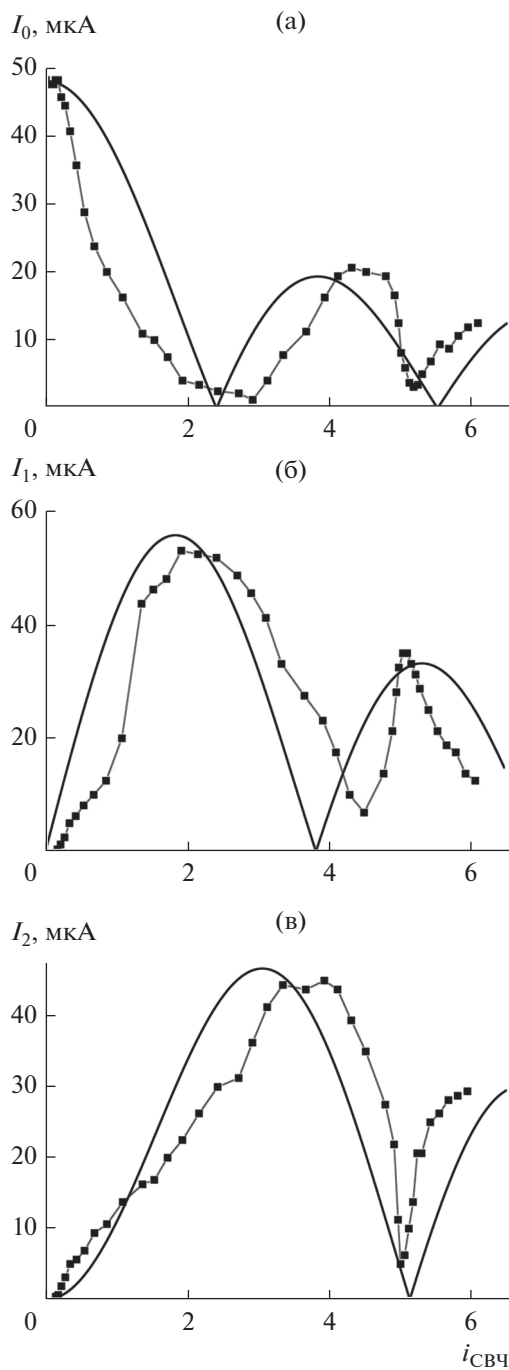


Рис. 3. Зависимости амплитуд критического тока I_0 (а) и ступеней Шапиро I_1 (б), I_2 (в) от нормированного значения тока СВЧ-воздействия на частоте $f = 70$ ГГц. Квадратики – экспериментальные значения, соединенные для наглядности линией; сплошные кривые – теоретические зависимости с аргументом, служащим подгоночным параметром.

(см. зависимости при затуханиях 23...19 дБ на рис. 4). Более интенсивный шумовой сигнал возникает на частоте $f=70$ ГГц, что видно из данных на рис. 5, где приведены зависимости $P_{ш}$ от P для обеих частот эксперимента.

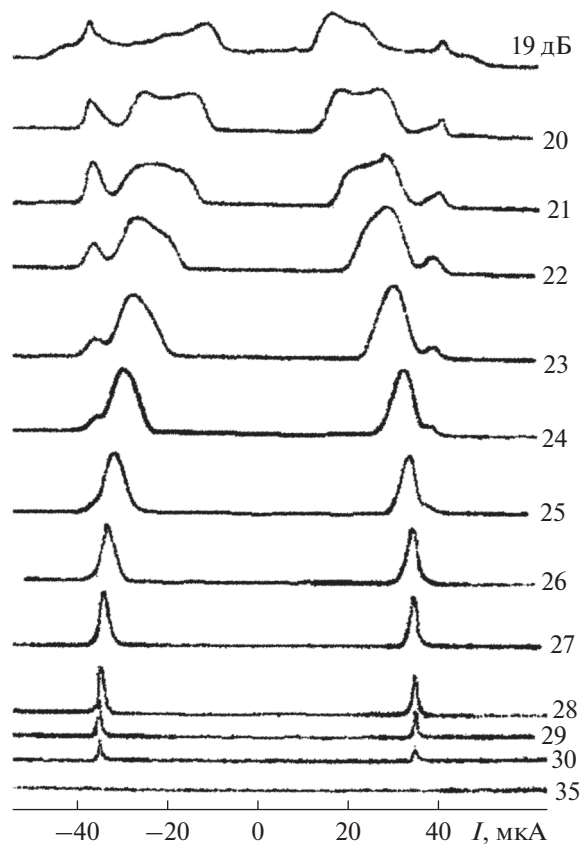


Рис. 4. Семейство зависимостей интенсивности шумового сигнала от тока смещения I , полученных при воздействии СВЧ-облучением на $f = 45$ ГГц при различных значениях затухания, вносимого аттенуатором. Шумовой сигнал регистрировался НЕМТ-усилителем в полосе частот от 1 до 2 ГГц.

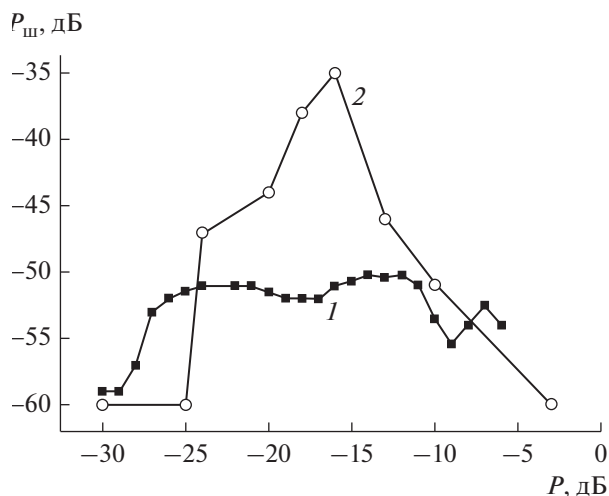


Рис. 5. Зависимости интенсивности сигнала шума $P_{ш}$ от относительного изменения мощности СВЧ-воздействия P на частотах $f=45$ (кривая 1) и 70 ГГц (кривая 2).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В сверхпроводниковой Nb/Au/Ca_{0.5}Sr_{0.5}CuO₂/YBa₂Cu₃O_{7- δ} гетероструктуре с антиферромагнитной барьерной прослойкой наблюдается нестационарный эффект Джозефсона, который при частотах внешнего воздействия близких к плазменной сосуществует со стохастическими колебаниями. При частоте СВЧ-воздействия порядка 0.6 от плазменной наблюдаются искажения ВАХ в виде участков с отрицательным динамическим сопротивлением и рост шумов на структуре. Необычная динамика таких структур с невысоким влиянием собственной емкости перехода, характеризующейся параметром МакКамбера $\beta_C = 2$, может быть объяснена нетривиальной фазовой динамикой, обусловленной магнитными свойствами барьерной прослойки, усиленной плазменным резонансом джозефсоновского перехода.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена в рамках государственного задания и частично поддержана Российским фондом фундаментальных исследований (проект 19-07-00143).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Buzdin A.I.* // Rev. Mod. Phys. 2005. V. 77. № 3. P. 935.
2. *Bergeret F.S., Volkov A.F., Efetov K.B.* // Rev. Mod. Phys. 2006. V. 77. № 4. P. 1321.
3. *Bozovic I., Logvenov G., Verhoeven M.A.J. et al.* // Phys. Rev. Lett. 2004. V. 93. № 15. P. 157002.
4. *Зайцев А.В., Овсянников Г.А., Константиныч К.И. и др.* // ЖЭТФ. 2010. Т. 137. № 2. С. 380.
5. *Constantinian K.Y., Ovsyannikov G.A., Kisilinskii Y.V. et al.* // J. Physics: Conf. Ser. 2010. V. 234. № 4. P. 042004.
6. *Константиныч К.И., Кислинский Ю.В., Овсянников Г.А. и др.* // ФТТ. 2013. Т. 55. № 3. С. 417.
7. *Kautz R., Monaco R.* // J. Appl. Phys. 1985. V. 57. № 3. P. 875.
8. *Бароне А., Патерно Дж.* Эффект Джозефсона. Физика и применения. М.: Мир, 1984.
9. *Bak P., Bruinsma R.* // Phys. Rev. Lett. 1982. V. 49. № 4. P. 249.
10. *Ben-Jacob E., Braiman Y., Shainsky R., Imry Y.* // Appl. Phys. Lett. 1981. V. 38. №10. P. 822.
11. *Shukrinov Yu.M., Botha A.E., Medvedeva S.Yu. et al.* // Chaos. 2014. V. 24. № 3. P. 033115.
12. *Komissinskiy P., Ovsyannikov G.A., Constantinian K.Y. et al.* // Phys. Rev. B. 2008. V. 78. № 2. P. 024501.
13. *Губанков В.Н., Константиныч К.И., Кошелец В.П., Овсянников Г.А.* // Письма в ЖТФ. 1982. Т. 8. № 24. С. 1332.
14. *Braude V., Blanter Ya.M.* // Phys. Rev. Lett. 2008. V. 100. № 20. P. 207001.